

ТЕЛЕМЕТРИЧНА СИСТЕМА ЗА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ПОЛЕТА НА БЕЗПИЛОТЕН ЕЛЕКТРИЧЕСКИ КВАДРОКОПТЕР

Павлин Граматиков

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramamatikov@space.bas.bg*

Ключови думи: *Телеметрия, летателни характеристики, безпилотен електрически квадрокоптер, електрически параметри, ArduPilot, Mission Planer, Linux, Mavlink*

Резюме: *Изследвана е телеметрична система за параметрите на полета на електрически квадрокоптер в различни комуникационни технологии. Разглеждат се блок -схеми на бордната част на системата. Приложени са графични данни от експериментални полети.*

TELEMETRY SYSTEM OF FLYING CHARACTERISTICS OF AN UNMANNED ELECTRIC QUADCOPTER

Pavlin Gramatikov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramamatikov@space.bas.bg*

Keywords: *Telemetry, flight characteristics, unmanned electric quadcopter, electrical parameters, ArduPilot, Mission Planer, Linux, Mavlink*

Abstract: *The telemetry system for the flight parameters of an electric quadcopter in various communication technologies was studied. Block diagrams of the onboard part of the system are considered. Graphical data of experimental flights were applied.*

Въведение

Известни са много системи за управление на мултикоптери. Интерес за изследователите представляват хардуерни платформи с отворен код (OSHP). В [7] са разгледани девет OSHP (виж фиг. 6). Популярни са три от тях, притежаващи борден и наземен софтуер: Betaflight; INAV и ArduPilot <https://ardupilot.org/>. Богати възможности за телеметрия има ArduPilot [5].

За постигане на повече функции и режими на AP се използват Linux базирани бордни контролери, които последните години се предлагат от все повече производители <https://ardupilot.org/copter/docs/common-autopilots.html#common-autopilots>. Затова за разработка на борден модул за експериментални полети с мултикоптери с цел проучване на техните летателните характеристики е предпочетен AP, базиран на Linux.

За телеметрия ще се използват две наземни станции GCS: Mission Planner [6] и QGroundControl <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/>. Те работят с Mavlink - протокол за информационно взаимодействие между борд и земя <https://ardupilot.org/dev/docs/mavlink-basics.html>. Той има LGPL лиценз с модул за python, header-only, C/C++ библиотека. Засега са завършени две версии на MAVLink: v1 и v2. Протоколът MAVLink (разработен 2009 година от Lorenz Meier <https://www.linkedin.com/in/meierlorenz> кодира и декодира пакети и предава данни с различни хардуерни и софтуерни средства. Например TCP/UDP съобщения, сериен порт или друг двупосочен обмен.

При използването на AP основното ограничение за бордния хардуер е размерът на флаш-памятта на FCU, нужна за обемистите нови версии на бордния софтуер, нуждаещи се

минимум от 1 MB RAM. При недостиг на RAM се губят част от функциите: MAVFTP, Compass Calibration, Logging, Terrain downloading.

Хардуерна част на проекта

Бе избран контролер BBB, препоръчан от AP за нови разработки и притежаващ перспективни ресурси на хардуера. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-beagle-bone-blue.html>

В Таблица 1 са сравнени полетните контролери от старо и ново поколение Pixracer R15 и BBB. Предимства на BBB са: вградени комуникация WiFi и Bluetooth; бърз 4GB eMMC flash; работа с външен дисплей <https://gist.github.com/jadonk/0e4a190fc01dc5723d1f183737af1d83> (Adafruit 2.4" TFT LCD with Touchscreen); независимо захранване от акумулаторна батерия; графичен процесор power sgx530 и три вградени преобразувателя на напрежение DC/DC (BEC),

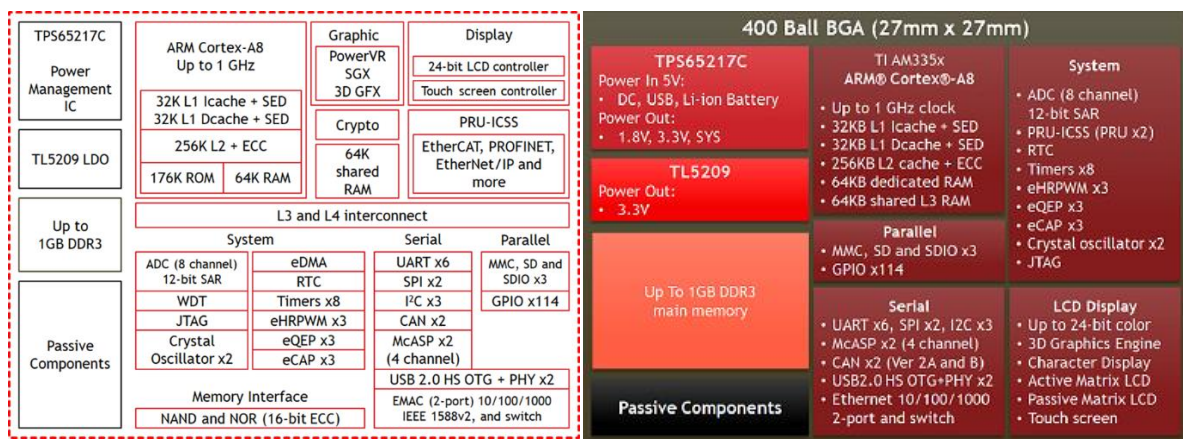
Лесно приложими интерфейси на BBB са: GPS, DSM2 radio, UART x5, SPI x2, I2C, 1.8V ADC, 6 buttons, 11 LEDs, CAN, 3.3V GPIO, USB 2.0 client and host, Bluetooth 4.1, WiFi-802.11bgn.

Таблица 1. Полетни контролери BBB и Pixracer R15

MCU	IMU	Baro- meter	OSD	Blackbox	Soft	Sensor	BEC [V]	Telemetry
Linux (Debian), ROS Octavo OSD3358 1GHz ARM Cortex-A8 512MB DDR3 RAM 4GB eMMC flash ARM Cortex-M3	MPU-9250 9-axis	BMP280	Yes	MicroSD 4GB USB 2.0 client and host	AP	Battery1 Battery2	Vbat2S 5 V 6 V	Bluetooth- 4.1 BLE WiFi- 802.11bgn Telemetry1 Telemetry2
STM32F427 168 MHz 256KB RAM 2 MB flash	MPU-9250	MEAS MS5611	ST LIS3MDL magneto- meter	MicroSD 4GB	AP	Battery1 Curr _{out}	no	Telemetry1 Telemetry2

От На Фиг. 1-а,б е показан чипът OSD3358 на бордния едноплатков компютър в корпус single BGA 27x27 mm, <https://octavosystems.com/docs/osd335x-datasheet/> както и друг хардуер:

- Texas Instruments Sitara™ AM335x ARM® Cortex®-A8 Processor
- 1 GB DDR3L Memory
- TPS65217C Power Management IC
- TL5209 LDO and over 140 Passive components



Фиг. 1. а,б. Блокова схема на контролера на BBB <https://octavosystems.com/docs/osd335x-datasheet/>

При произволна комбинация на входните източници (USB порт, 5 V от адаптер или една литиево-йонна батерия) микросхемата TPS65217C (виж Фиг. 2а,б) има следните функции https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps65217.pdf?ts=1634134805150&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fdocument-viewer%252Ftps65217%252Fdatasheet%252Fdevice-images-dv: заряд на една клетка литиево-йонни или литиеви батерии; един повишаващ преобразувател за захранване до 10 светодиода; три понижавачи преобразувателя с работна честота 2,25 MHz за ядрото, паметта и системата. Размерите на TPS65217C са 6 x 6 mm.

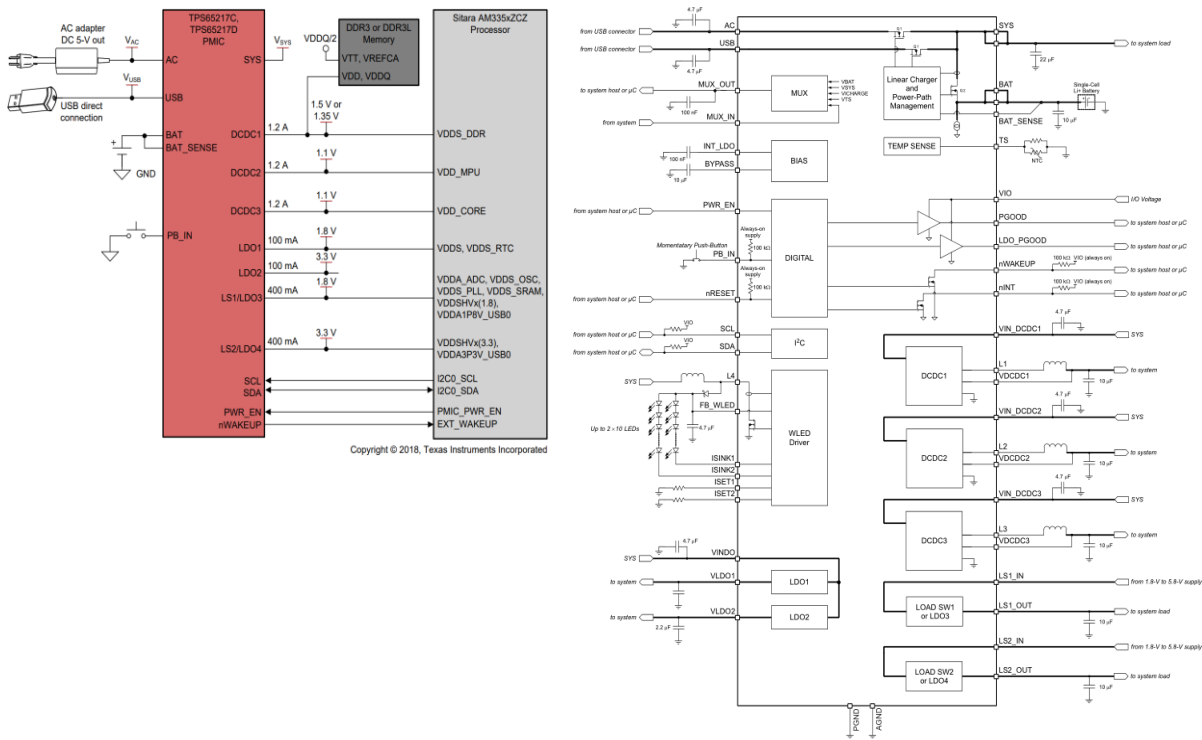
Чипът TL5209 LDO представлява нискошумящ аналогов регулатор с нисък спад на напрежение и осигурява 3,3 V. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl5209.pdf?ts=1634130830520>

С два чипа TB6612FN6, захранени от V_BAT (6,6÷8,4 V) са реализирани четири мощни драйвери за четири постояннотокови двигателя, (виж Фиг. 3). Всеки изход е изпълнен в схема на пълен мост. Един чип управлява два двупосочни DC двигателя или един биполярен стъпков двигател. За един изход за двигателя се допускат 3 A максимален и 1 A постоянен ток. <https://www.tme.eu/Document/f69c44f5b284761d41a1fa952256eb8d/TB6612FNG.pdf>.

Има три режима на двигателя: CW; CCW; short brake and stop mode. Възможни DC двигателя са Hobby Gearmotor - 140 RPM и Hobby Motor – Gear.

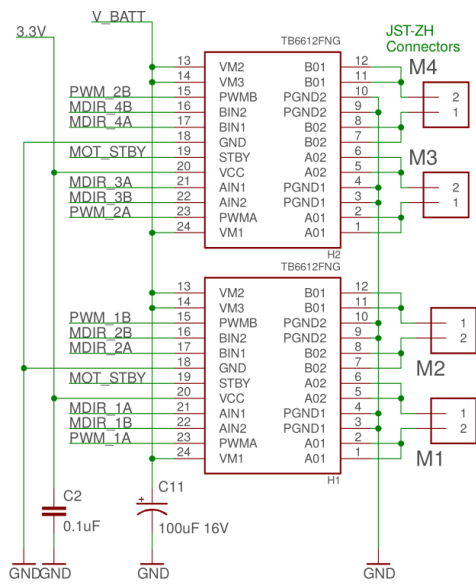
На Фиг. 4а е дадено свързването към 2S батерия V_BAT и външно захранване VCC в диапазона от 9 V до 18 V. За акумулатор се препоръчват 1 Ah 2S 20C LiPo или 1,6 Ah 2S 20C. На Фиг. 4-а,б са дадени два преобразувателя: BEC-5V с изходна мощност 20 W, който е изграден с чип AP1509 и BEC-6V, изпълнен с чип AOZ1284. Към изхода на BEC-6V може да се свържат следните серво мотори: Parallax Inc. 900-00005 Standard Servo; Hobby King SKU HD-1900A и TowerPro SG92R-7.

На Фиг. 5-а,б са дадени сензорът BMP280 за барометрична височина <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp280-ds001.pdf> както и сензорът MPU-9250 за IMU <https://github.com/bolderflight/MPU9250/blob/main/docs/MPU-9250-Datasheet.pdf>. Той съдържа датчици на Хол и има размер 3x3x1 mm. Осъществява 3 функции; жирокоп по 3 оси; акселерометър и магнитометър по 3 оси.



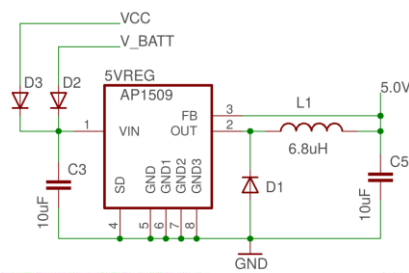
Фиг. 2-а,б. Схема на TPS65217C <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps65217.pdf>

MOTOR DRIVERS

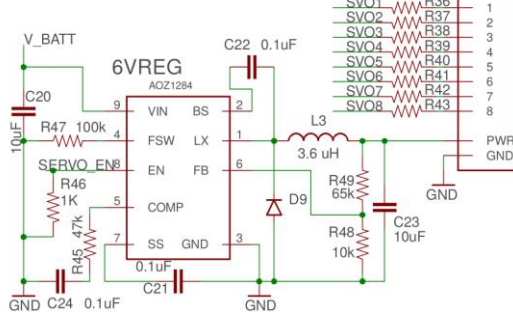


Фиг. 3. Драйвери за 4 двигателя

2A 5V Regulator

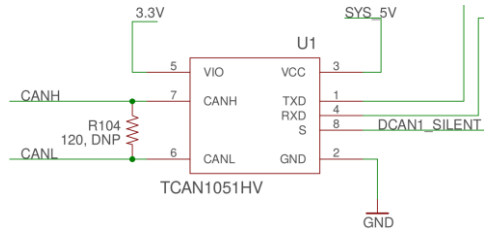
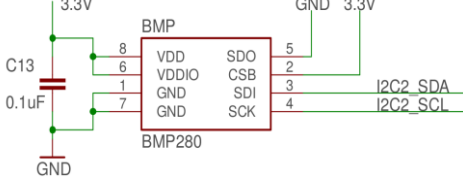


Servo Connectors & Power Control



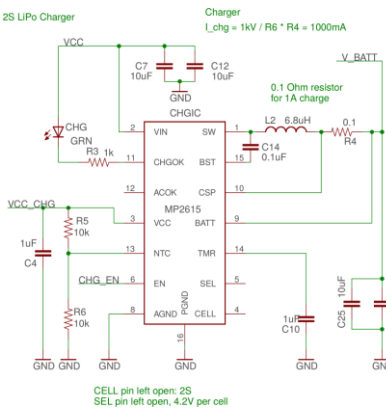
Фиг. 4-а,б. BEC-5V, BEC-6V за серво машинки

Barometer

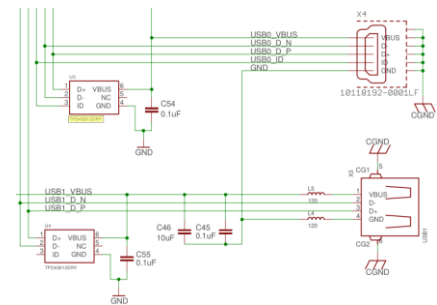
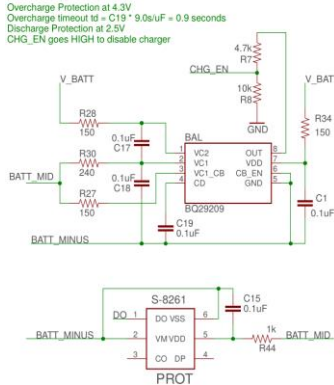


Фиг. 5-а,б. Схема на барометър и IMU

2S LiPo Charger



2S Lithium Balancer and Protection



Фиг. 5-а,б.,в BEC за 2S LiPo батерия, изравнител и защита на два USB входа.

С чип MP2615 <https://www.monolithicpower.com/en/mp2615.html> при входно напрежение от 9÷18 V се зарежда 2S LiPo батерия с програмируем ток до 2 A (виж Фиг. 5а). Работи с честота 760 KHz и има два изхода за светодиоди - край на заряда и валидно входно напрежение.

Чипът BQ29209 <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq29209-q1.pdf> следи за презаряд по напрежение и балансира при заряд две литий-йонни батерии (виж Фиг. 5б). Двата USB входа са защитени от повреда по пренапрежения от TPD4S012 (виж Фиг. 5в). Всеки от тях има 2 ценера и 6 диода за защита на USB сигналите D+, D- и ID. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpd4s012.pdf>

Софтуерна част на проекта

BBV работи със следния софтуер https://wiki.seeedstudio.com/BeagleBone_Blue/: Debian, ArduPilot, ROS, Graphical programming with LabVIEW, Cloud9 IDE on Node.js w/ BoneScript library и др. Направена е инсталация на Debian Linux и ArduPilot на бордната част на телеметричната система. При поставяне на софтуер на BBV се появяват три основни задачи <https://github.com/mirkix/ardupilotblue> :

А) Инсталиране на Linux

1. *Update software*: sudo apt update && sudo apt upgrade -y
2. *Install software*: sudo apt install -y bb-cape-overlays cpufrequtils
3. *Set clock to 1GHz*:
sudo sed -i 's/GOVERNOR="ondemand"/GOVERNOR="performance"/g' /etc/init.d/cpufrequtils
4. *Update scripts*: cd /opt/scripts && sudo git pull
5. *Maximize the microSD card's existing partition*: sudo /opt/scripts/tools/grow_partition.sh
6. *Install RT Kernel 4.9*: sudo /opt/scripts/tools/update_kernel.sh --ti-rt-channel --lts-4_9
7. *Specify device tree binary to be used at startup*:
sudo sed -i 's/#dtb=dtb=am335x-boneblue.dtb/g' /boot/uEnv.txt
8. *Reboot system*: sudo reboot

Б) Инсталиране на ArduPilot

1. Download ready compiled ArduPilot file from <http://bbbmini.org/download/blue/>
2. Copy file via SCP or microSD

В) Настройки на ArduPilot

1. *ArduCopter*: sudo /home/debian/arducopter (plus parameter)
2. Set the right value for SERIALx_BAUD and SERIALx_PROTOCOL
3. Connect a MAVLink groundstation with:
IP 192.168.178.26 add -C udp:192.168.178.26:14550
4. To use MAVLink via radio connected to UART4 add -C /dev/ttyO4.
If there is a GPS connected to UART5 add -B /dev/ttyO5

Тук производителят е дал подробно описание <https://beagleboard.org/upgrade>.

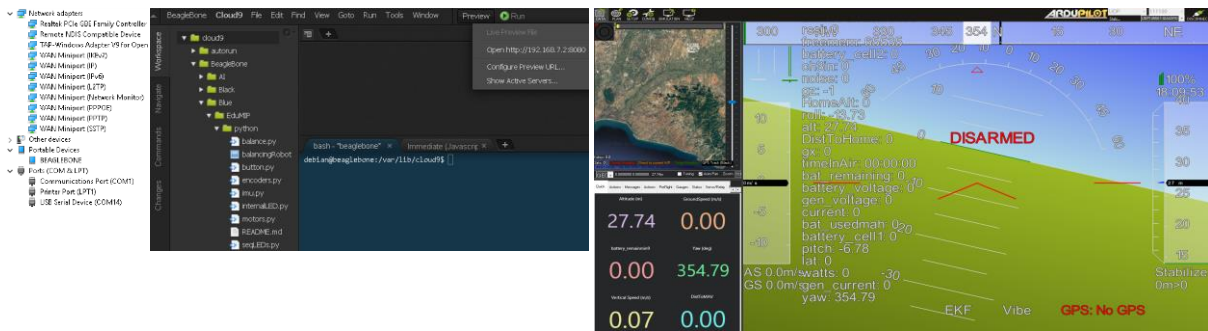
Вместо Linux може да се инсталира ROS https://dscl.lcsr.jhu.edu/home/courses/edumip_ros/
Акcesoарите към BBV се намират тук <https://github.com/beagleboard/beaglebone-blue/wiki/Accessories> . На Фиг 7а е показани три процеса свързани с BBV: Remote NDIS Compatible Device, BEAGLEBONE, USB Serial Device (COM14). На Фиг 7б е показан Cloud9 IDE, управляващ BBV. На Фиг 7в и Фиг 8. има данни и настройки на телеметрията на GCS MP по WiFi.

Collection of but not limited to, supported features for OSS flight controller platforms.

Platform	Airframes	Autonomous Flight	Communication	Fault detection and handling	Features
Hack flight	mr(4)	-	pm,sb,ds,msp	-	-
Cleanflight	mr(1-8)/fw	sph,swp	sb,ib,sd,sh,pm,pw,cf,jeb,ds,xbu,fs,sp,ht,lt,ml,sl,msp	c2k,bvw	g,bm,dl,rth,hf,ts,at
Betaflight	mr(1-8)/fw	sph,swp	sb,ib,sd,sh,pm,pw,cf,jeb,ds,xbu,fs,sp,ht,lt,ml,sl,msp	c2l,c2k,bvw	g,bm,dl,rth,hf,ts,at
INAV	mr(1-8)/fw	fm,swp,sph	sb,ib,sd,sh,pm,pw,cf,jeb,ds,xbu,fs,sp,ht,lt,ml,msp	c2l,c2k,bvw,c2rl	g,at,bm,dl,rth,at
LibrePilot****	mr(3-8)/fw	sph, swp, atl	sb,ib,sd,sh,pm,pw,xbu,fs,ht,ml,sl,msp	c2k	g,rth,bac,bm
dRonin****	mr(*)/fw	sph	sb,fs,ht,ml,ut,msp	pa	bm,dl,at,rth
ArduPilot	mr(1-8)/fw	svnf,sph,swp	sb,pm,ds,fs,ml	ar,sw,apr,sc,c2rl,c2l,c2k,bll,gf	g,rlg,loa,bm,rth,***
PX4	mr(1-8)/fw	sph,swp,fm	sb,sd,ds,fs,sp,ht,ml,ir	gf,c2k,c2l,c2rl,sc,apr	g,rth,bm,dl,rlg,loa,***
Paparazzi	mr(+)/fw	sph,swp,atl,fw,svnf	pm,sb,xbe,ml	ar,sw,apr,sc,c2rl,c2l,c2k,bll,gf	g,pa,rth,bm,dl,hf,ts,at,rlg,loa,bac

*: Not found in documentation; **: See parameters for more features [28]; ***: See parameters for more [29]; ****: Low source reliability; +: Limited by hardware; Airframes mr: multicopter (number of propellers); fw: fixed wings; Autonomous Flight sph: Satellite position hold; swp: Stereo vision navigation functions; Communication sb: SBus; ib: iBus; sd: SumD; sh: SumH; pm: PPM; pw: PWM; cf: CRSF; jeb: JetiExBus; ds: DSM; xbu: XBUS; xbe: Xbee; fs: FrSky; sp: SmartPort (s.port); ht: HoTT; lt: LTM; ml: MavLink; sl: SRXL; ut: UAVTalk; msp: Multiwii serial protocol; ir: Iridium SBD; Fault detection and handling ar: ADS-B receiver support; c2l: Landing when missing C2 link; c2rl: Return to launch or home after missing C2 link; c2k: Kill supply for motors after missing C2 link; bwv: Battery voltage warning; ada: Auto disarm after timeout; apr: Automatic parachute release; sw: Safety switch to en-/disable output to motors; bll: Land or return to launch if battery low; gf: Geofence; sc: Pre-Arm Safety Check for sensor error; Features g: gimbal compatible; pa: Prevent arming when battery low; rth: Return to home; bm: Battery monitoring; dl: Data logging to flash; hf: Head free moving (yaw fixed); ts: Transponder support; at: PID autotune; rlg: Supports retractable landing gear; loa: Lidar obstacle avoidance; bac: Battery mAh count;

Фиг. 6. Сравнение на 9 платформи с отворен код на софтуера [7]



Фиг. 7-а,б,в. Екрани на: Device Manager; AWS Cloud9 и GCS MP визуализиращ данни по WiFi



Фиг. 8. Списък на характеристики на полета, предавани и записвани от GCS MP по WiFi

Заклучение

Обсъдена е възможността за телеметрия в реално време на летателни и електрически параметри при реален полет в затворено помещение. Извършена е двустранна комуникация по WiFi и USB кабел между борда и земната станция на важни параметри на полета. За визуализация и запис на летателни параметри на борда се използва MicroSD карта като черна кутия. В наземната част на телеметричната система на лаптоп и смартфон се визуализира и записва изображението от пилотската камера заедно с част от OSD параметри на полета.

Благодарности

Проектът стартира с материалното съдействие на Първа Частна Експериментална Лаборатория за Аерокосмически Изследвания (ПЧЕЛАКИ), „Райт – Аероспейс” – ЕООД, <https://rait-aerospace.com/index.htm>. Предстои завършване на борден блок с BVB и монтажът му на авторска конструкция на осмокоптер с тегло 12 kg (4G8M-12-SEA), разработен от инж. Райчо Тодоров, президент на ПЧЕЛАКИ. В следващи публикации ще има данни от полети с 4G8M-12-SEA.

Таблица 2. Списък на съкращенията

ALT	Altitude	INS	Inertial Navigation System
AP	ArduPilot	MAVLink	Micro Air Vehicle Link
APM	ArduPilot autopilot	MP	Mission Planer
BATT	Battery	OSD	On-screen display
BBB	BeagleBone Blue	OSS	Open Source Software
BEC	Battery Elimination Circuit	OSHP	Open-Source Hardware platforms
CTUN	Control Tuning	PDB	Power Distribution Board
ESC	Electronic Speed Control	PWM	Pulse Width Modulation
FCU	Flight Controller Unit	PCS	Position Control System
FPV	First-person view.	PM	Power Module
GCS	Ground Control Station	RC	Radio Control
GPS	Global Positioning System	ROS	Robot Operating System
GYRO	Gyroscope	WP	Waypoint
IMU	Inertial Measurement Unit	UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Литература:

1. A. Nayyar and V. Puri, "A Review of Beaglebone Smart Board's-A Linux/Android Powered Low Cost Development Platform Based on ARM Technology," *2015 9th International Conference on Future Generation Communication and Networking (FGCN)*, 2015, pp. 55–63, doi: 10.1109/FGCN.2015.23.S.
https://www.researchgate.net/profile/Anand-Nayyar/publication/304412094_A_Review_of_Beaglebone_Smart_Board's-A_LinuxAndroid_Powered_Low_Cost_Development_Platform_Based_on_ARM_Technology/links/5798c71408ae33e89fb0ae57/A-Review-of-Beaglebone-Smart-Boards-A-Linux-Android-Powered-Low-Cost-Development-Platform-Based-on-ARM-Technology.pdf
2. Molloy, Derek. *Exploring BeagleBone: Tools and techniques for building with embedded Linux*. Book molloy2019exploring. Publisher John Wiley & Sons. 2019. pp. 1-599
https://books.google.bg/books?hl=en&lr=&id=GBDTBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR25&ots=OVizDAUZzN&sig=I0ky0s1EyJAe9CfHAuhfvlecugY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
Benjamin Komel. *Beaglebone Blue robotski krmilnik*. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani. Fakulteta za elektrotehniko. Ljubljana, 2018. pp. 1-101
<https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=110961&lang=eng>
3. Dr. Richard Grimmett. *BeagleBone Robotic Projects Second Edition*. Copyright © 2017 Packt Publishing. Published by Packt Publishing Ltd. Livery Place 35 Livery Street Birmingham B3 2PB, UK. ISBN 978-1-78829-313-6, Book pp. 1–100
https://books.google.bg/books?hl=en&lr=&id=gpFyAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT13&dq=BeagleBone+Robotic+Projects+Second+Edition&ots=6Ce7katLCv&sig=iR8-uYEy5DQ-x7IXITfIIN-ndMw&redir_esc=y#v=onepage&q=BeagleBone%20Robotic%20Projects%20Second%20Edition&f=false
www.packtpub.com
4. Yaser Alaiwi, Aşkın Mutlu 1. MODELLING, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS UNMANNED QUADROTOR. INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL "Machines. Technologies. Materials.", 2018, WEB ISSN 1314-507X; PRINT ISSN 1313-0226, pp. 320–325
<https://stumejournals.com/journals/mtm/2018/8/320.full.pdf>
6. Yoon, S.; Shin, D.; Choi, Y.; Park, K. Development of a Flexible and Expandable UTM Simulator Based on Open Sources and Platforms. *Aerospace* 2021, 8, 133. pp. 1–16
<https://doi.org/10.3390/aerospace8050133>
7. Emad Ebeid, Martin Skriver Kristian, Husum Terkildsen, Kjeld Jensen, Ulrik Pagh Schultz. A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators. *Microprocessors and Microsystems* Volume 61, September 2018, Pages 11–20
<https://doi.org/10.1016/j.micpro.2018.05.002>
8. Alexandr Myasishev. Проектирование многофункционального бпла роторного типа на базе прошивки ardupilot, ВІСНИК СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ імені Володимира Даля, August 2021, pp. 1–8
https://www.researchgate.net/publication/353934801_PROEKTIVANIE_MNOGOFUNKCIONALNOG_O_BPLA_ROTORNOGO_TIPA_NA_BAZE_PROSIVKI_ARDUPILOT